Sustav regulacije razine tekućine laboratorijskog modela sustava prijenosa vode

Baričević, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:149312

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**

Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 87

SUSTAV REGULACIJE RAZINE TEKUĆINE LABORATORIJSKOG MODELA SUSTAVA PRIJENOSA VODE

Matej Baričević

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 87

SUSTAV REGULACIJE RAZINE TEKUĆINE LABORATORIJSKOG MODELA SUSTAVA PRIJENOSA VODE

Matej Baričević

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zagreb, 4. ožujka 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 87

Pristupnik:	**Matej Baričević (0036517689)**
Studij:	Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil:	Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor:	prof. dr. sc. Igor Erceg

Zadatak: **Sustav regulacije razine tekućine laboratorijskog modela sustava prijenosa vode**

Opis zadatka:

Potrebno je proučiti dokumentaciju laboratorijskog modela sustava prijenosa vode koji se sastoji od dva spremnika vode, pumpe upravljane preko frekvencijskog pretvarača, grijača, hladnjaka, senzora razine, programirljivog logičkog kontrolera i operacijskog panela. Algoritam upravljanja sustavom razine tekućine laboratorijskog modela sustava prijenosa vode potrebno je izraditi u programirljivom logičkom kontroleru. Upravljački program treba programirati prema IEC 61131 standardu. Osim regulacije razine tekućine u spremniku, potrebno je osigurati da temperatura tekućine u spremniku bude unutar dozvoljenih granica. Programirljivi logički kontroler potrebno je povezati s operacijskim panelom (human machine interface, HMI) te na istom prikazati trenutna stanja sustava. Također, na HMI-u potrebno je isprogramirati mogućnost postavljanja parametara sustava.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Igoru Ercegu na pomoći koju mi je pružio u protekle tri godine studiranja te prilikom izrade diplomskog rada. Hvala i mojoj obitelji, kolegama i prijateljima na potpori i pomoći kroz cijeli studij. Najveće hvala dragome Bogu koji mi je bio izvor snage u najtežim trenucima studiranja.

Sadržaj

1. Uvod **3**

2. Opis zadatka **4**

3. Opis laboratorijskog modela **5**

3.1. Asinkroni stroj 6

3.2. Frekvencijski pretvarač 6

3.3. Programirljivi logički kontroler 7

3.4. Operacijski panel 9

4. Algoritam upravljanja razine tekućine **11**

4.1. Matematički model laboratorijskog postava 11

4.1.1. Regulator brzine protoka 12

4.1.2. Regulator razine tekućine 14

4.2. Implementacija algoritma upravljanja u programskom paketu *EcoStruxure Machine Expert* 15

4.2.1. Implementacija regulatora brzine protoka 15

4.2.2. Implementacija regulatora razine tekućine 18

4.3. Rezultati algoritma upravljanja razinom tekućine 19

4.4. Eksperimentalno dobiveni parametri regulatora brzine protoka i razine tekućine 20

5. Algoritam upravljanja temperature tekućine **22**

6. Vizualizacijsko sučelja **24**

7. Zaključak **29**

Literatura **30**

Sažetak **31**

Abstract **32**

Popis slika **33**

Popis tablica **34**

A: Programski kod **35**

1. Uvod

U radu je izrađen algoritam upravljanja laboratorijskim modelom sustava prijenosa vode. Upravljanje sustavom prijenosa vode realizirano je u programirljivom logičkom kontroleru prema IEC 61131 standardu. Izrađenim algoritmom upravljanja reguliraju se razina i temperatura tekućine. Regulacija razine tekućine izvedena je pomoću motoriziranog proporcionalnog ventila i pumpe, a temperatura tekućine se regulira s grijačem i hladnjakom. Upravljanje i nadzor sustava vrši se na vizualizacijskom sučelju koje se nalazi na laboratorijskom postavu.

Rad se sastoji od ukupno šest sedam poglavlja. Nakon uvoda, u drugom poglavlju dan je opis zadatka rada, a u trećem poglavlju opisan je laboratorijski postav za koji je izrađen algoritam upravljanja. Nakon toga opisan je postupak sinteze regulatora protoka i razine tekućine te njihova implementacija u programirljivi logički rezultat. U istom poglavlju prikazani su rezultati izrađenog algoritma upravljanja razinom tekućine.

Za regulaciju temperature tekućine odabran je zbog jednostavnosti implementacije histerezni regulator. Pomoću histereznog regulatora temperatura tekućine se održava unutar željenog histereznog pojasa. Implementacija histereznog regulatora i eksperimentalno dobiveni rezultati regulacije temperature tekućine opisani su u petom poglavlju. U šestom poglavlju opisano je vizualizacijsko sučelje izrađeno za upravljanje sustavom prijenosa tekućine. Pomoću izrađenog vizualizacijskog sučelja još se može nadzirati trenutno stanje sustava te promijeniti parametre regulatora. Konačno, u posljednjem poglavlju nalazi se zaključak rada.

2. Opis zadatka

Zadatak rada je proučiti dokumentaciju laboratorijskog modela sustava prijenosa vode te izraditi algoritam upravljanja regulacije razine tekućine i temperature tekućine za navedeni laboratorijski model. Također, potrebno je napraviti vizualizacijsko sučelje na operacijskom panelu za upravljanje sustavom prijenosa vode. Laboratorijski model sustava prijenosa vode sastoji se od dva spremnika tekućine, pumpe upravljane pomoću frekvencijskog pretvarača, dva ventila, grijača, hladnjaka, senzora razine tekućine, dva temperaturna senzora, programirljivog logičkog kontrolera i operacijskog panela.

Algoritam upravljana razinom i temperaturom tekućine izrađen je u programirljivom logičkom kontroleru prema IEC 61131 standardu. Za izradu algoritma upravljanja razinom tekućine prvo je izrađen matematički model laboratorijskog postava te su iz matematičkog modela sintetizirani regulatori protoka i razine tekućine. Za upravljanje temperaturom tekućine izrađen je histerezni regulator koji održava temperaturu tekućine unutar dozvoljenih granica.

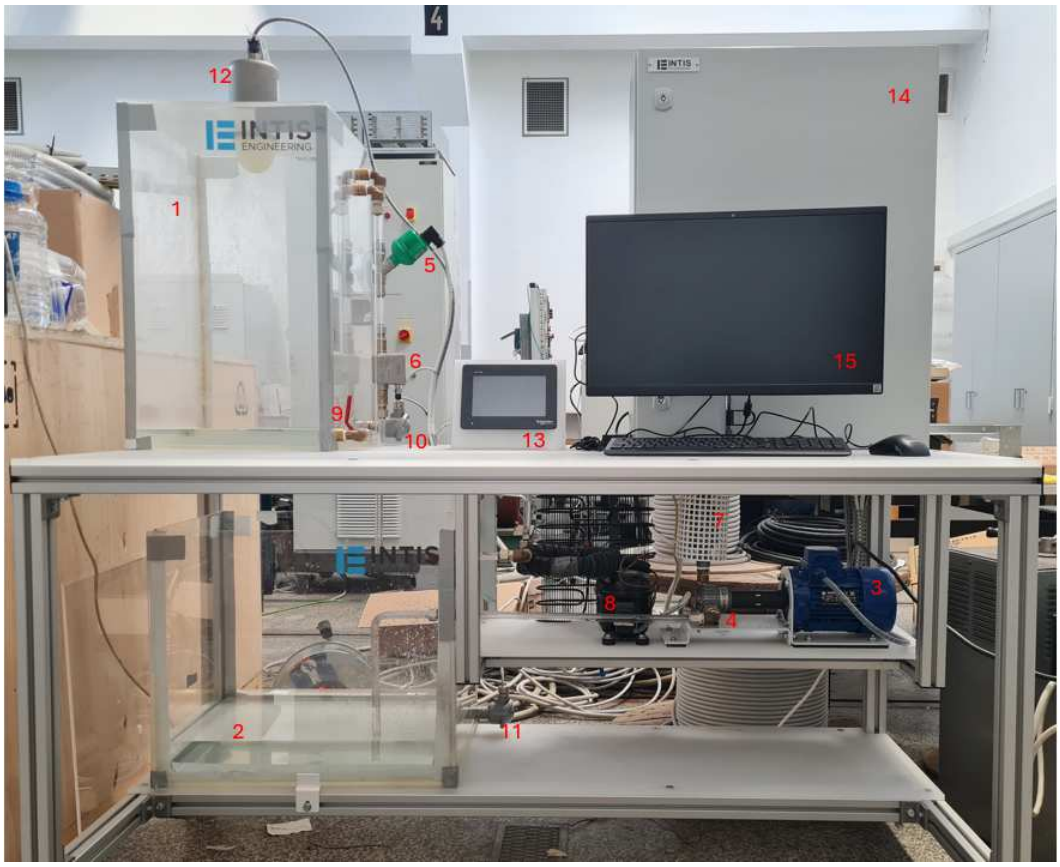
Upravljanje sustavom prijenosa vode vrši se na operacijskom panelu (*human machine interface*, HMI) koji je povezan s programirljivim logičkim kontrolerom. Na operacijskom panelu moguće je zadavati željenu razinu tekućine i temperaturu tekućine te su prikazana trenutna stanja sustava. Također, na operacijskom panelu je isprogramirana mogućnost postavljanja parametara sustava i prikaz upozorenja i grešaka.

3. Opis laboratorijskog modela

Laboratorijski model sustava prijenosa vode prikazan je slikom 3.1. Laboratorijski model ima dva spremnika vode označena brojevima 1 i 2 na slici. Gornji spremnik (broj 1 na slici) je spremnik za koji je izrađen algoritam upravljanja razine tekućine i temperature tekućine. Površina baze gornjeg spremnika iznosi 0.147 m^2, a visina mu je 0.655 m te je zapremnina gornjeg spremnika približno 96 L. Donji spremnik (broj 2) služi za pohranu preostale tekućine. Tekućina se iz donjeg spremnika prenosi u gornji pomoću motora (broj 3) na čiju je osovinu spojena pumpa (broj 4) i motoriziranog proporcionalnog ventila (broj 5). Za mjerenje protoka koristi se elektromagnetski mjerač protoka prikazan brojem 6 na slici. Za zagrijavanje tekućine koristi se grijač prikazan brojem 7, a za hlađenje tekućine hladnjak prikazan brojem 8. Grijač je smješten tako da se tekućina zagrijava dok se prenosi iz donjeg u gornji spremnik, a hladnjak je smješten tako da se tekućina hladi kad se gornji spremnik prazni. Za pražnjenje gornjeg spremnika koristi se ručni ventil (broj 9). Svaki spremnik ima temperaturni senzor PT100 za mjerenje temperature tekućine (brojevi 10 i 11). Brojem 12 na slici je prikazan senzor razine tekućine za gornji spremnik.

Na slici3.1. još se nalaze operacijski panel (broj 13), elektro ormar (broj 14) i računalo (broj 15). Računalo je korišteno za izradu algoritma upravljanja razinom i temperaturom tekućine te za izradu vizualizacijskog sučelja. Algoritam upravljanja sustavom izrađen je pomoću programskog paketa *EcoStruxure Machine Expert*, a vizualizacijsko sučelje pomoću programskog paketa *Vijeo Designer*.

Unutrašnjost elektro ormara je prikazana slikom 3.2. U elektro ormaru se nalaze PLC, frekvencijski pretvarač, ispravljač napona, releji i zaštitni elementi. Popis komponenti koje se nalaze u elektro ormaru dan je tablicom 3.1. Frekvencijski pretvarač koji se nalazi u elektro ormaru nije korišten za izradu rada, nego je korišten frekvencijski



Slika 3.1. Laboratorijski postav

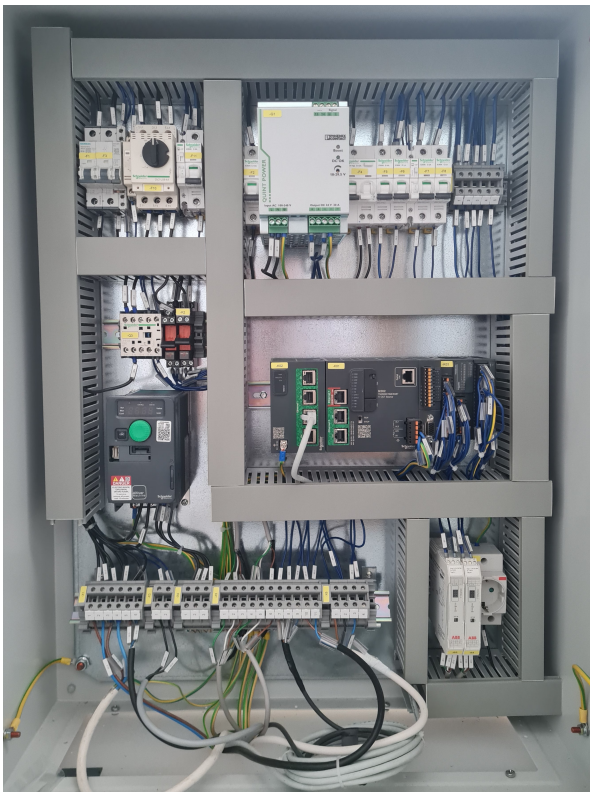
pretvarač opisan u poglavlju 3.2.

3.1. Asinkroni stroj

U radu je korišten asinkroni stroj koji je proizveo Končar MES. Nazivni podaci asinkronog stroja nalaze se u tablici 3.2. Asinkroni stroj je spojen na izlaz frekvencijskog pretvarača te se s frekvencijskim pretvaračem upravlja brzinom vrtnje asinkronog stroja. Na osovinu asinkronog stroja spojena je pumpa koja može prenijeti do 3000 litara tekućine u satu.

3.2. Frekvencijski pretvarač

Frekvencijski pretvarač korišten u radu je ATV930U22M3 (slika 3.3.) tvrtke Schneider Electric. ATV930U22M3 je frekvencijski pretvarač za upravljanje pogonima promjenjive brzine do 2.2 kW. Najbitniji podaci frekvencijskog pretvarača nalaze se u tablici 3.3., a detaljnije informacije o frekvencijskom pretvaraču nalaze se u [1]. Frekvencijski pretva-



Slika 3.2. Unutrašnjost elektro ormara

rač je u radu korišten za napajanje motora pumpe, to jest za upravljanje brzinom vrtnje motora. U radu je izabrano vektorsko upravljanje brzinom vrtnje.

Frekvencijski pretvarač dobiva referentnu vrijednost brzine vrtnje motora od PLC-a. Komunikacija između PLC-a i frekvencijskog pretvarača je uspostavljena korištenjem komunikacijskog protokola Modbus TCP/IP. Modbus TCP/IP je komunikacijski protokol u kojem nadređeni uređaj šalje upravljačku riječ podređenom uređaju, a podređeni sustav vraća nadređenom sustavu informaciju o trenutnom stanju [2]. U radu je nadređeni uređaj PLC, a podređeni uređaj je frekvencijski pretvarač.

3.3. Programirljivi logički kontroler

Za izradu algoritma upravljanja sustavom prepumpavanja korišten je programirljivi logički kontroler TM262M15MESS8T [3] tvrtke Schneider Electric. TM262M15MESS8T je programirljivi logički kontroler namijenjen za upravljanje sustavima gibanja. PLC ima četiri digitalna ulaza i izlaza te jedan ulaz za enkoder. Na PLC su priključena i dva I/O modula, TM3DM24RG i TM3AM6G te komunikacijski modul TMSES4.

Tablica 3.1. Popis opreme u elektro ormaru

Oznaka opreme	**Opis opreme**
F1	Prekidač za napajanje elektro ormara
F2	Automatski osigurač za DC napajanje
F3	Prekidač za napajanje grijača i hladnjaka
F4	Sklopka za utičnicu E1
F5	Automatski osigurač za PLC
F6	Automatski prekidač za ulazno izlazne module PLC-a
F7	Automatski prekidač za PT100 temperaturne senzore i senzor razine tekućine
F8	Sklopka za napajanje operacijskog panela
F10	Termo-magnetska motor zaštitna sklopka za frekvencijski pretvarač
F11	Automatski prekidač za motorni proporcionalni ventil
G1	Ispravljač napona 100...240VAC/24VDC 20A
K1	Relej za grijač
K2	Relej za hladnjak
U1	Frekvencijski pretvarač Altivar Machine ATV320
K01	Programirljivi logički kontroler TM262M15MESS8T
K02	Pametni komunikacijski modul TMSES4
K03	Diskretni I/O modul TM3DM24RG
K04	Analogni I/O modul TM3AM6G
E1	Utičnica

TM3DM24RG je diskretni I/O modul s šesnaest ulaza i osam izlaza. U radu su iskorištena tri ulaza diskretnog modula i dva izlaza. Na ulaze diskretnog modula dovedeni su signali s prekidača za napajanje grijača i hladnjaka, temperaturnih senzora i senzora razine tekućine te za napajanje proporcionalnog ventila. Na izlaze diskretnog modula spojeni su relej grijača i relej hladnjaka.

TM3AM6G je analogni I/O modul s četiri ulaza i dva izlaza koji imaju strujni električni signal 4–20 mA. Na ulaze modula dovedeni su signali s temperaturnih senzora za gornji i donji spremnik, signal s mjerača protoka te sa senzora razine tekućine gornjeg spremnika. U radu je iskorišten jedan izlaz analognog modula kojim se zadaje referenca motoriziranom proporcionalnom ventilu. Popis svih signala spojenih na I/O module i memorijske lokacije koje zauzimaju nalazi se u tablici 3.4.

Tablica 3.2. Nazivni podaci asinkronog stroja

Končar - MES d.d.	
3∼	
DY 230/400 V	2.4/1.4 A
0.55 kW	0.82 cosφ
2770 rpm	50 Hz

Slika 3.3. Frekvencijski pretvarač [1]

3.4. Operacijski panel

Operacijski panel koji se nalazi na laboratorijskom postavu je HMIDT351 tvrtke Schneider Electric [4]. HMIDT351 je napredni operacijski panel s ekranom osjetljivim na dodir koji služi za nadziranje i komunikaciju u automatskim sustavima upravljanja. Operacijski panel je u radu korišten za upravljanje laboratorijskim modelom sustava prepumpavanja te za prikaz trenutnih stanja sustava i promjenu parametara sustava.

Tablica 3.3. Nazivni podaci frekvencijskog pretvarača

Altivar 930 ATV930U22M3	
Ulazni napon	200-240 V
Ulazna struja	8.4 A
Ulazna frekvencija	50/60 Hz
Izlazni napon	0...200-240 V
Izlazna struja	11.2 A
Izlazna frekvencija	0-500 Hz
Maksimalna snaga	2.2 kW

Tablica 3.4. Popis ulaznih i izlaznih signala spojenih na I/O module

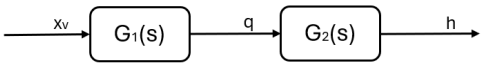
Digitalni ulazi	
DI0.1	Napajanje grijača i hladnjaka
DI0.2	Napajanje PT100 temperaturnih senzora
DI0.4	Napajanje proporcionalnog ventila
Digitalni izlazi	
DQ2.1	Relej za uključivanje grijača
DQ2.2	Relej za uključivanje hladnjaka
Analogni ulazi	
AIW0	Temperaturni senzor donjeg spremnika
AIW1	Temperaturni senzor gornjeg spremnika
AIW2	Senzor elektromagnetskog mjerača protoka
AIW3	Senzor razine tekućine gornjeg spremnika
Analogni izlaz	
AQ0	Motorizirani proporcionalni ventil

4. Algoritam upravljanja razine tekućine

Kako bi se izradio algoritam upravljanja razine tekućine vode u spremniku prvo je izrađen matematički model laboratorijskog postava. Pomoću matematičkog modela laboratorijskog postava određeni su regulatori brzine protoka kroz motorizirani proporcionalni ventil i razine tekućine u gornjem spremniku u kontinuiranoj domeni. Dobiveni regulatori su zatim diskretizirani i implementirani u PLC pomoću programskog paketa EcoStruxure Machine Expert.

4.1. Matematički model laboratorijskog postava

Matematički model laboratorijskog postava u otvorenom krugu prikazan je slikom 4.1. $G_1(s)$ predstavlja matematički model proporcionalnog ventila, a $G_2(s)$ matematički model gornjeg spremnika. Detaljan izvod matematičkog modela se nalazi u [5]. Prijenosne funkcije modela mehaničkog sustava određene su izrazima:

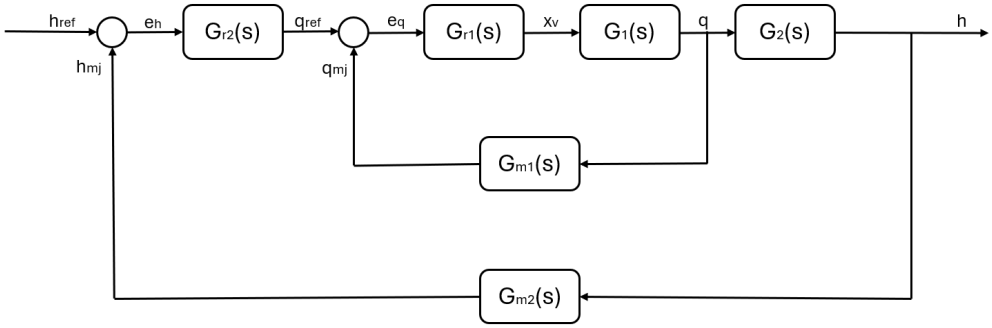


Slika 4.1. Matematički model laboratorijskog postava u otvorenom krugu

$$G_1(s) = \frac{1.3667 \times 10^{-6}}{1 + 0.5s} \tag{4.1}$$

$$G_2(s) = \frac{1}{0.147s} \tag{4.2}$$

Zahtjev na sustav je da se postigne referentna razina tekućine u spremniku u što kraćem vremenu uz aperiodski odziv. Kako bi se to ostvarilo određen je zatvoreni krug regulacije. Zatvoreni krug regulacije prikazan je slikom 4.2. U zatvoreni krug regulacije dodani su regulatori $G_{r1}(s)$ za unutarnju petlju po brzini protoka i $G_{r2}(s)$ za vanjsku petlju po razini tekućine u gornjem spremniku. Također, dodani su i mjerni članovi brzine protoka $G_{m1}(s)$ i razine tekućine $G_{m2}(s)$. Kašnjenje mjernih članova je vrlo maleno te se u ovom radu zanemaruje. Ovom nadogradnjom postignuta je kaskadna regulacija razine tekućine gornjeg spremnika kojom se osigurava dobro praćenje reference razine tekućine.



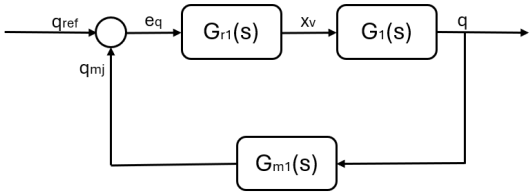
Slika 4.2. Matematički model laboratorijskog postava u zatvorenom krugu

4.1.1. Regulator brzine protoka

Za određivanje regulatora brzine protoka razmatra se samo unutarnja petlja matematičkog model prikazana slikom 4.3. Prijenosna funkcija proporcionalnog ventila sadrži jedan pol i nema astatizma te je stoga odabran PI regulator protoka određen prema tehničkom optimumu [6]. Vremenska konstanta PI regulatora je odabrana tako da poništi pol prijenosne funkcije $G_1(s)$, a proporcionalno pojačanje određeno je korištenjem sljedećeg izraza:

$$K_P = \frac{1}{2} \times \frac{1}{K_1} \times \frac{T_I}{T_\Sigma} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{1.3667 \times 10^{-6}} \times \frac{0.5}{0.5} = 3.66 \times 10^5 \tag{4.3}$$

Konačno, dobiven je PI regulator sljedeće prijenosne funkcije:



Slika 4.3. Unutarnja petlja matematičkog modela laboratorijskog postava

$$G_{r1}(s) = K_P \frac{1 + T_I s}{T_I s} = 3.66 \times \frac{1 + 0.5s}{0.5s} \tag{4.4}$$

Unutarnja petlja regulacije se sad zbog pojednostavljenja matematičkog modela može zapisati kao jedna prijenosna funkcija. Zatvoreni krug unutarnje petlje se može odrediti pomoću sljedećeg izraza:

$$G_{z1}(s) = \frac{G_{o1}(s)}{G_{m1}(s) + G_{o1}(s)} \tag{4.5}$$

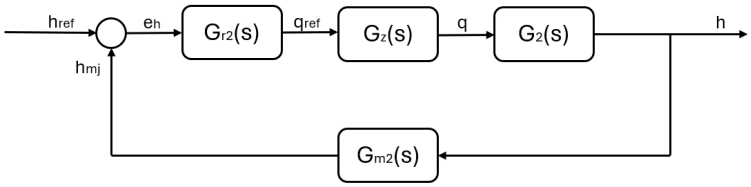
Gdje je $G_{o1}(s)$ član otvorenog kruga unutarnje petlje regulacije određen izrazom:

$$G_{o1}(s) = G_{r1}(s) \times G_1(s) = 3.66 \times 10^5 \times \frac{1 + 0.5s}{0.5s} \times \frac{1.3667 \times 10^{-6}}{1 + 0.5s} = \frac{1}{s} \tag{4.6}$$

Uvrštavanjem (4.6) u (4.5) dobiva se sljedeći izraz:

$$G_{z1}(s) = \frac{\frac{1}{s}}{1 + \frac{1}{s}} = \frac{1}{1 + s} \tag{4.7}$$

Ovom zamjenom može se pojednostaviti blokovska shema matematičkog modela kojom se olakšava postupak sinteze regulatora u vanjskoj petlji. Nova blokovska shema matematičkog modela prikazana je slikom 4.4.



Slika 4.4. Pojednostavljeni matematički model laboratorijskog postava u otvorenom krugu

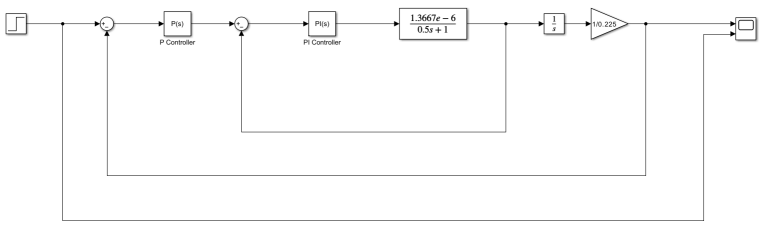
4.1.2. Regulator razine tekućine

Za sintezu regulatora razine tekućine prvo je potrebno promotriti otvoreni krug regulacije. Otvoreni krug regulacije određen je sljedećim izrazom:

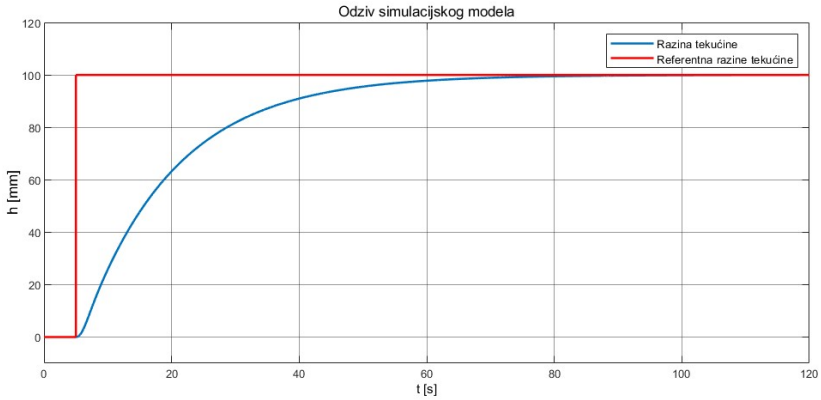
$$G_{o2}(s) = G_{r2}(s) \times G_{z1}(s) \times G_2(s) = G_{r2}(s)\frac{1}{1+s}\frac{1}{0.147s} \tag{4.8}$$

Iz izraza (4.8) vidi se da proces sadrži integracijski član te je potrebno koristiti P regulator jer bi PI regulator unio još jedan integracijski član i sustav bi postao nestabilan. Pojačanje P regulatora određeno je korištenjem programskog paketa *MATLAB Simulink*. U *Simulinku* je napravljen model prikazan slikom 4.5. te se korištenjem opcije *Tune* u izborniku *P Controller* odredio parametar K_P regulatora razine tekućine. Jedan od zahtjeva sustava je da nema nadvišenja prilikom regulacije razine tekućine zato što se u automatskom načinu rada upravlja samo jednim ventilom, to jest sustav mora imati aperiodski odziv. Određeno je da sustav ima zadovoljavajući odziv (slika 4.6.) s pojačanjem regulatora $K_P = 0.07$ te regulator razine tekućine ima sljedeći oblik:

$$G_{r2}(s) = K_P = 0.07 \tag{4.9}$$



Slika 4.5. Simulacijski model laboratorijskog postava



Slika 4.6. Odziv simulacijskog modela

4.2. Implementacija algoritma upravljanja u programskom paketu *EcoStruxure Machine Expert*

Za implementaciju algoritma upravljanja u PLC koristi se programski paket *EcoStruxure Machine expert*. U programskom paketu *EcoStruxure Machine Expert* napravljen je program koji sadrži regulatore brzine protoka i razine tekućine gornjeg spremnika. Da bi se regulatori implementirali u PLC prvo je provedena diskretizacija regulatora. Za diskretizaciju regulatora koristi se Eulerova kauzalna integracija kojom se operator s iz Laplaceove domene aproksimira korištenjem sljedećeg izraza:

$$s \approx \frac{1 - z^{-1}}{T} \tag{4.10}$$

Gdje je T vrijeme diskretizacije. Vrijeme diskretizacije određeno je hardverom PLC-a i iznosi 1 ms.

4.2.1. Implementacija regulatora brzine protoka

Regulator brzine protoka kako je prije objašnjeno je PI regulator. Općeniti izraz za PI regulator u Laplaceovoj domeni je sljedeći:

$$G_r(s) = K_P \frac{1 + T_I s}{T_I} \tag{4.11}$$

Kako bi se dobio diskretni PI regulator prvo je potrebno je u izrazu (4.11) operator s zamijeniti izrazom (4.10). Ovom zamjenom dobije se sljedeći izraz:

$$G_r(z) = K_P \frac{1 + T_I \frac{1-z^{-1}}{T}}{T_I \frac{1-z^{-1}}{T}} = K_P \frac{T + T_I(1 - z^{-1})}{T_I(1 - z^{-1})} \tag{4.12}$$

Nakon što je dobiven izraz za PI regulator u Z-domeni određena je diskretna jednadžba regulatora sljedećim postupkom:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = K_P \frac{T + T_I(1 - z^{-1})}{T_I(1 - z^{-1})} \tag{4.13}$$

$$T_I Y(z) - T_I Y(z) z^{-1} = K_P(T + T_I)U(z) - K_P T_I U(z) z^{-1} \tag{4.14}$$

$$T_I Y(z) = K_P(T + T_I)U(z) - K_P T_I U(z) z^{-1} + T_I Y(z) z^{-1} \tag{4.15}$$

$$Y(z) = K_P \frac{(T + T_I)}{T_I} U(z) - K_P U(z) z^{-1} + Y(z) z^{-1} \tag{4.16}$$

$$Y(z) = K_P(1 + \frac{T}{T_I})U(z) - K_P U(z) z^{-1} + Y(z) z^{-1} \tag{4.17}$$

$$y[k] = K_P(1 + \frac{T}{T_I})u[k] - K_P u[k-1] + y[k-1] \tag{4.18}$$

Izraz (4.18) predstavlja diskretnu jednadžbu PI regulatora koja se može implementirati u digitalni sustav, to jest u PLC. Komponenta $u[k]$ predstavlja ulaz u regulator, a komponenta $y[k]$ izlaz iz regulatora. Komponente $u[k-1]$ i $y[k-1]$ predstavljaju ulaz i izlaz regulatora iz prošlog ciklusa izvođenja. PI regulator je u programskom paketu *EcoStruxure Machine Expert* programiran kao funkcijski blok korištenjem programskog jezika *Structured Text* (ST). Kod funkcijskog bloka prikazan je slikom 4.7.

Regulator je implementiran u cikličkom zadatku koji se izvodi svaku milisekundu. Na ulaze su dovedene varijable referentne i mjerene brzine protoka te parametri regu-

```
1   // Izračun razlike između referentne veličine i mjerene veličine
2   u := in_ref - in_mj;
3
4   // Izračun izlaza iz diskretnog regulatora
5   y := Kp * (1 + T/Ti) * u - Kp * u_prev + y_prev;
6
7   // Ograničavanje izlazne vrijednosti
8   IF y > y_max THEN
9       y := y_max;
10  ELSIF y < y_min THEN
11      Y := y_min;
12  END_IF
13
14  // Pamćenje prošlih vrijednosti
15  u_prev := u;
16  y_prev := y;
```

Slika 4.7. Funkcijski blok PI regulatora

latora, a izlaz iz regulatora je referentna vrijednost otvorenosti proporcionalnog ventila u postotku. Izlaz iz regulatora je ograničen na vrijednosti od 0 % do 100 %. Popis svih varijabli zajedno s tipom i definicijom varijable prikazan je tablicom 4.1.

Tablica 4.1. Popis varijabli funkcijskog bloka PI regulatora

Ulazne varijable		
in_ref	REAL	Referentna vrijednost brzine protoka
in_mj	REAL	Mjerena vrijednost brzine protoka
Kp	REAL	Proporcionalno pojačanje regulatora
Ti	REAL	Integralna vremenska konstanta regulatora
T	REAL	Vrijeme diskretizacije
y_max	REAL	Maksimalna vrijednost izlaza regulatora
y_min	REAL	Minimalna vrijednost izlaza regulatora
Izlazne varijable		
y	REAL	Referenca za otvorenost proporcionalnog ventila
Privremene varijable		
u	REAL	Razlika između referentne i mjerene brzine protoka
Lokalne varijable		
u_prev	REAL	Prošla vrijednost ulaza u regulator
y_prev	REAL	Prošla vrijednost izlaza iz regulatora

4.2.2. Implementacija regulatora razine tekućine

Regulator razine tekućine je P regulator. P regulator ima samo parametar proporcionalnog pojačanja Kp pa regulator ima isti oblik u Laplaceovoj i Z-domeni. P regulator u Z-domeni opisan je sljedećim izrazom:

$$G_r(z) = K_P \tag{4.19}$$

Diskretna jednadžba P regulatora je puno jednostavnija od diskretne jednadžbe PI regulatora. Iz izraza (4.19) izvedena je diskretna jednadžba P regulatora sljedećim postupkom:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = K_P \tag{4.20}$$

$$Y(z) = K_P U(z) \tag{4.21}$$

$$y[k] = K_P u[k] \tag{4.22}$$

Izraz (4.22) predstavlja diskretnu jednadžbu P regulatora. P regulator je također programiran kao funkcijski blok korištenjem programskog jezika ST. Kod funkcijskog bloka prikazan je slikom 4.8.

```
1   // Osiguravanje da regulator radi samo kad je referentna razina tekućine
2   // veća od stvarne razine tekućine u gornjem spremniku
3   IF in_ref > in_mj THEN
4
5       // Izračun razlike između referentne veličine i mjerene veličine
6       u := in_ref - in_mj;
7
8       // Izračun izlaza iz regulatora
9       y := Kp * u;
10
11  END_IF
```

Slika 4.8. Funkcijski blok P regulatora

Regulator razine tekućine je implementiran u istom zadatku kao i regulator brzine protoka. Na ulaze su dovedene varijable referentne i mjerene razine tekućine te parame-

tri regulatora, a izlaz iz regulatora je referentna vrijednost brzine protoka koja se šalje na ulaz regulatora brzine protoka. Popis svih varijabli zajedno s tipom i definicijom varijable prikazan je tablicom 4.2.

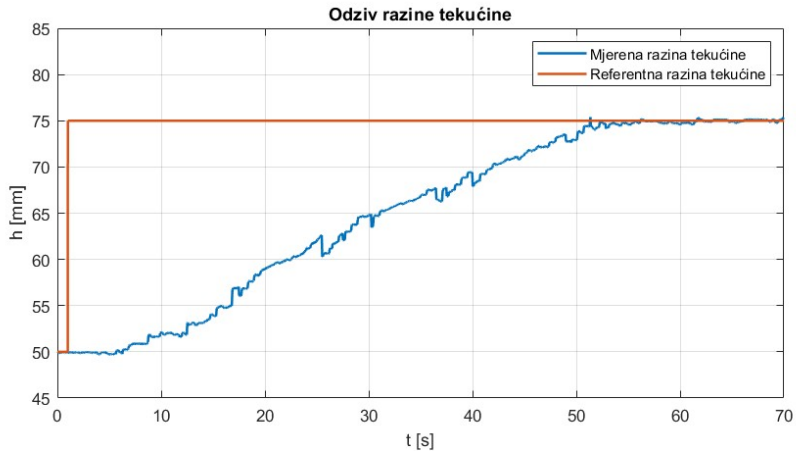
Tablica 4.2. Popis varijabli funkcijskog bloka P regulatora

Ulazne varijable		
in_ref	REAL	Referentna vrijednost razine tekućine
in_mj	REAL	Mjerena vrijednost razine tekućine
Kp	REAL	Proporcionalno pojačanje regulatora
Izlazne varijable		
y	REAL	Referenca za brzinu protoka
Privremene varijable		
u	REAL	Razlika između referentne i mjerene razine tekućine

4.3. Rezultati algoritma upravljanja razinom tekućine

Algoritam upravljanja razinom tekućine testiran je skokovitom promjenom referentne razine tekućine u gornjem spremniku s 50 mm na 75 mm. Za dobar odziv dovoljno je upravljanje sustavom samo s proporcionalnim ventilom te se stoga pumpa vrti konstantnom brzinom od 1250 min^{-1}. Dobiveni odziv je prikazan slikom 4.9. Iz odziva se može primijetiti da se referentna razina tekućine postiže bez nadvišenja, to jest sustav ima aperiodski odziv što je jedan od glavnih zahtjeva na sustav. Druga bitna informacija je da sustav u stacionarnom stanju gotovo nema grešku, a oscilacije u mjerenju razine tekućine su posljedica uzburkavanja tekućine.

Skokovita promjena reference razine tekućine se događa u trenutku 1s. Iz odziva prikazanog slikom 4.9. može se primijetiti da sustav ima mrtvo vrijeme od 5.3 s. To je potrebno vrijeme koje je potrebno da pumpa počne vući vodu iz donjeg spremnika i dovede kroz cjevovod do gornjeg spremnika. Nakon što se gornji spremnik počeo puniti potrebno je još 49.5 s da razina tekućine u gornjem spremniku dosegne referentnu vrijednost. Nakon što je tekućina u gornjem spremniku dosegnula referentnu vrijednost pumpa se zaustavlja, frekvencijski pretvarač isključuje i proporcionalni ventil zatvara.



Slika 4.9. Odziv razine tekućine

4.4. Eksperimentalno dobiveni parametri regulatora brzine protoka i razine tekućine

Parametri regulatora dobiveni u poglavljima 4.1.1. i 4.1.2. predstavljaju početne parametre regulatora koji su dobar početak prilikom traženja zadovoljavajućih parametara regulatora. Međutim, odziv opisan u poglavlju 4.3 se može poboljšati promjenom parametara. Zbog toga je eksperimentalno određeno da je bolji odziv dobiven sa sljedećim parametrima regulatora:

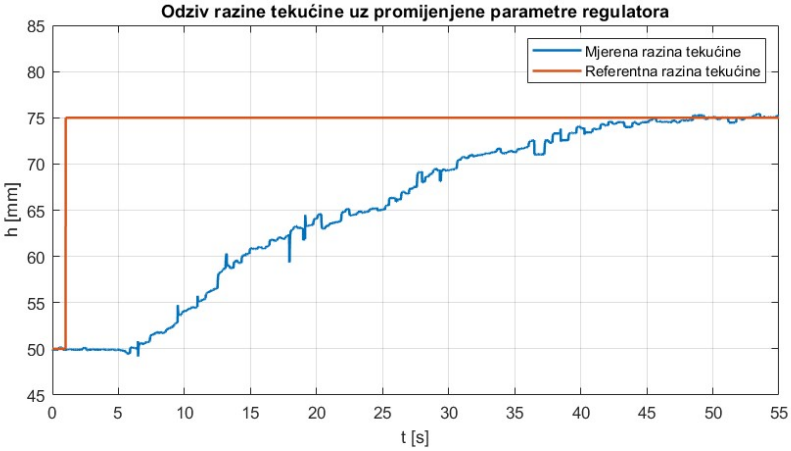
$$K_P = 0.35 \tag{4.23}$$

$$K_{PI} = 6.5 \times 10^5 \tag{4.24}$$

$$Ti = 0.5s \tag{4.25}$$

Odziv dobiven s promijenjenim parametrima regulatora prikazan je slikom 4.10. Prikazani odziv je također snimljen za skokovitu promjenu referentne razine tekućine s $50\,mm$ na $75\,mm$. Sa slike 4.10. se može primijetiti da se s promijenjenim parametrima dobiva brži odziv, a da se time ne narušava preciznost upravljanja razinom tekućine. Mrtvo vrijeme sustava je i dalje približno $5.3\,s$, međutim vrijeme porasta je značajno kraće. S promijenjenim parametrima regulatora sustav ima vrijeme porasta od $41.7\,s$ što je za $7.8\,s$ brže od vremena porasta s početnim parametrima regulatora. Daljnjom promjenom parametara nije moguće poboljšati odziv sustava jer dolazi do nadvišenja koje nije

poželjno.



Slika 4.10. Odziv razine tekućine uz promijenjene parametre regulatora

5. Algoritam upravljanja temperature tekućine

Za upravljanje temperaturom tekućine u gornjem spremniku programiran je histerezni regulator. Histerezni regulator radi na način da održava temperaturu unutar zadanog pojasa histereze. Ukoliko temperatura tekućine padne ispod donje granice histereznog regulatora uključuje se grijač na laboratorijskom postavu te se tekućina grije prolazeći kroz njega dok ne dosegne gornju granicu. Kad temperatura tekućine dosegne gornju granicu grijač se isključuje. Ukoliko temperatura tekućine prijeđe gornju granicu histereznog regulatora uključuje se hladnjak te se tekućina hladi dok ne dosegne donju granicu histereznog pojasa. Kad temperatura tekućine dosegne donju granicu histereznog regulatora hladnjak se isključuje.

Za histerezni regulator napisan je funkcijski blok korištenjem programskog jezika ST. Programski kod histereznog regulatora prikazan je slikom 5.1. Histerezni regulator je programiran tako da se grijač ne uključuje kad se dosegne donja granica histereznog pojasa ako se do tog trenutka tekućina hladila pomoću hladnjaka. Isto vrijedi i za hladnjak prilikom zagrijavanja tekućine grijačem. Popis varijabli funkcijskog bloka i definicija tih varijabli dani su u tablici 5.1.

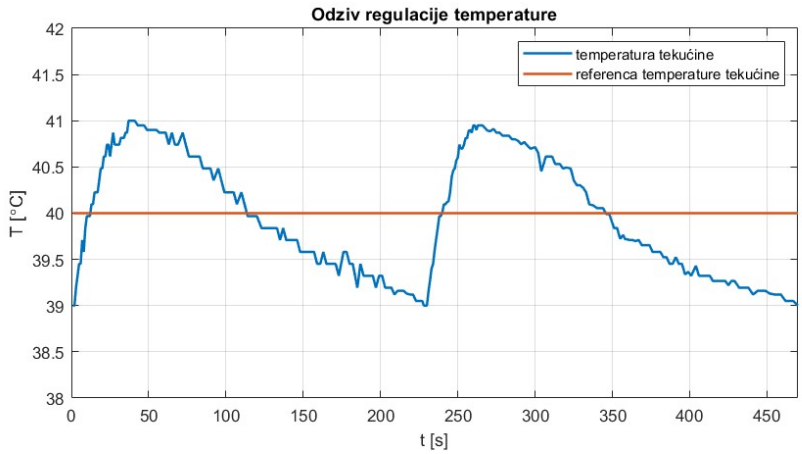
```
1   // Histerezni regulator za regulaciju temperature tekućine pomoću hladnjaka i grijača
2
3   // Upravljanje kod dosezanja gornje granice regulacije
4   IF temp_mj > (temp_ref + hyst_band/2) AND NOT heater_ON THEN
5       cooler := TRUE;
6       hand_valve_temp := TRUE;
7   ELSIF temp_mj > (temp_ref + hyst_band/2 - 0.1) THEN
8       heater := FALSE;
9       hand_valve_temp := FALSE;
10  END_IF
11
12  // Upravljanje kod dosezanja donje granice regulacije
13  IF temp_mj < (temp_ref - hyst_band/2) AND NOT cooler_ON THEN
14      heater := TRUE;
15      hand_valve_temp := TRUE;
16  ELSIF temp_mj < (temp_ref - hyst_band/2 + 0.1) THEN
17      cooler := FALSE;
18      hand_valve_temp := FALSE;
19  END_IF
20
```

Slika 5.1. Funkcijski blok temperaturnog regulatora

Tablica 5.1. Popis varijabli funkcijskog bloka temperaturnog regulatora

Ulazne varijable		
temp_ref	REAL	Referentna vrijednost temperature tekućine
temp_mj	REAL	Mjerena vrijednost temperature tekućine
hyst_band	REAL	Histerezni pojas
heater_ON	BOOL	Informacija o stanju grijača
cooler_ON	BOOL	Inforemacija o stanju hladnjaka
Izlazne varijable		
heater	BOOL	Relej grijača
cooler	BOOL	Relej hladnjaka
hand_valve_temp	BOOL	Informacija da je potrebno otvoriti ručni ventil zbog regulacije temperature

Rad histereznog regulatora ispitan je pri razini tekućine u gornjem spremniku od 40 mm. Željena temperatura tekućine postavljena je na 40 $°C$ uz histerezni pojas od 2 $°C$. Dobiveni rezultati prikazani su slikom 5.2. Iz odziva se može primijetiti da se temperatura tekućine mijenja od temperature 39 $°C$ do 41 $°C$. Dok se tekućina grije otvoren je ručni ventil kako se ne bi premašila željena razina tekućine u gornjem spremniku. Nakon što se tekućina zagrijala do gornje granice histereznog pojasa grijač se isključuje i zatvara se ručni ventil te se posljedično zaustavlja pumpanje vode u gornji spremnik. Nakon što tekućina dosegne gornju granicu histereznog regulatora ona se hladi zbog niže temperature okoline do donje granice histereznog regulatora. Kada tekućina dosegne donju granicu histereznog regulatora ponovno se započinje proces grijanja tekućine nakon što se otvori ručni ventil.



Slika 5.2. Odziv regulacije temperature

6. Vizualizacijsko sučelja

Vizualizacijsko sučelje je u radu izrađeno kako bi se upravljalo sustavom prijenosa tekućine. Za izradu vizualizacijskog sučelja korišten je HMI softver za konfiguraciju Vijeo Designer. Pomoću vizualizacijskog sučelja se može zadavati željena razina i temperatura tekućine u gornjem spremniku te se mogu nadgledati i mijenjati određeni parametri sustava. Vizualizacijsko sučelje se sastoji od ukupno tri prozora i dva skočna prozora.

Prozor koji se otvara prilikom pokretanja vizualizacijskog sučelja je prozor za prijavu korisnika prikazan slikom 6.1. Prozor za prijavu korisnika se sastoji od dva polja u koja se unose korisničko ime i lozinka korisnika. Ukoliko se unese krivo korisničko ime ili lozinka pojavljuje se skočni prozor koji obavještava korisnika o unosu krivih podataka (slika 6.2.).

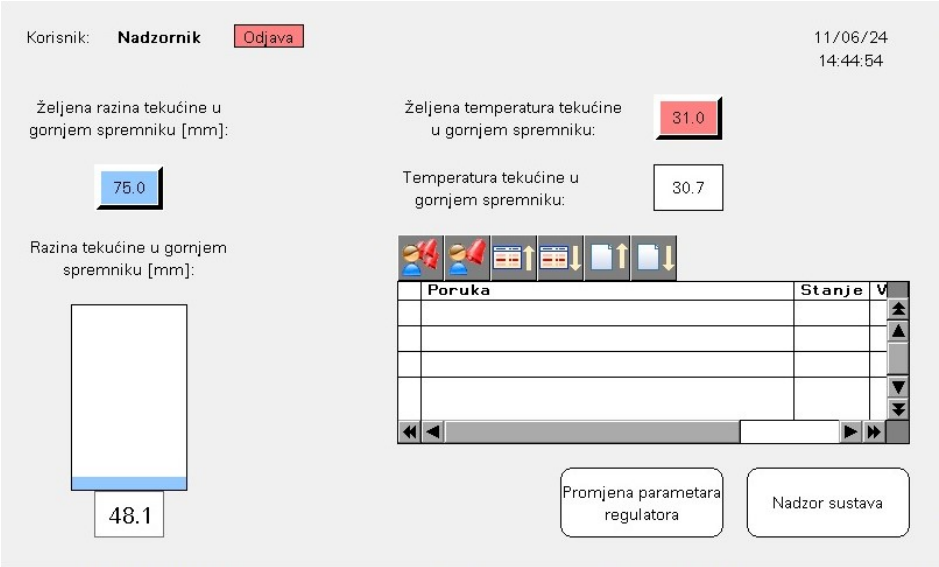
Slika 6.1. Prijava korisnika

U svrhu izrade rada definirana su dva korisnika vizualizacijskog sučelja s različitim razinama ovlasti, Operater i Nadzornik. Operater je korisnik koji ima mogućnost nadgledanja sustava i zadavanja željene razine i temperature tekućine u gornjem spremniku.

Slika 6.2. Neispravna prijava korisnika

Nadzornik je korisnik koji ima sve mogućnosti kao i Operater, ali dodatno još može mijenjati histerezni pojas regulatora temperature te parametre regulatora brzine protoka i razine tekućine.

Nakon unosa ispravnih podataka pritiskom na tipku Prijava otvara se početni prozor za upravljanje sustavom prijenosa tekućine prikazan slikom 6.3. Slika 6.3. prikazana je za korisnika Nadzornik. Jedina razlika između korisnika Nadzornik i korisnika Operater je da korisnik Operater na glavnom prozoru nema tipku Promjena parametara regulatora koja otvara skočni prozor za promjenu parametara svih regulatora.



Slika 6.3. Glavni prozor vizualizacijskog sučelja

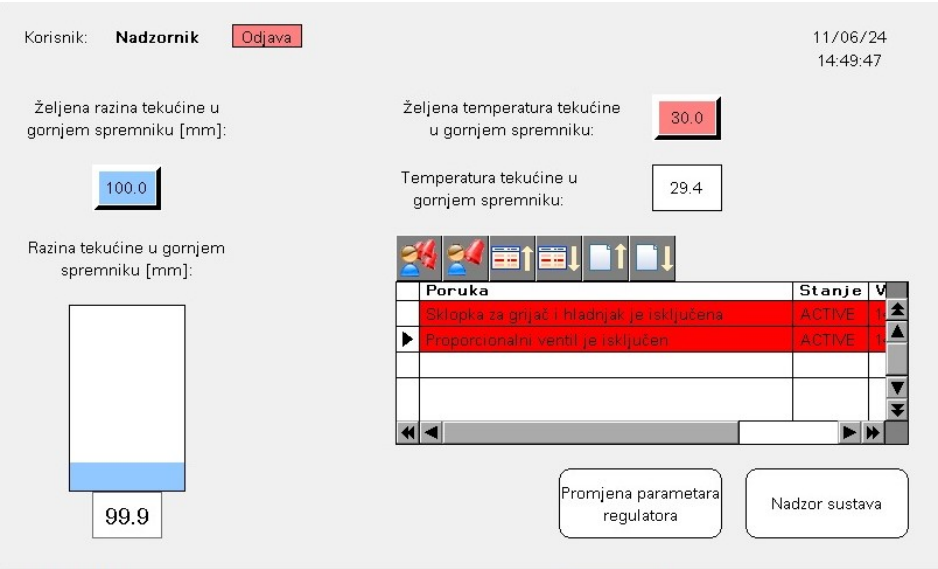
Na glavnom prozoru za upravljanje sustavom moguće je zadavati željenu razinu i

temperaturu tekućine u gornjem spremniku te nadzirati stvarnu razinu tekućine i temperaturu tekućine u gornjem spremniku. Razina tekućine se zadaje u milimetrima u opsegu od 0 do 655 mm, a temperatura u stupnjevima Celzijevima od $0°C$ do $70°C$.

Na početnom prozoru još se nalazi prikaz alarma i grešaka. Izrađena su četiri alarma koja signaliziraju grešku u sustavu prepumpavanja vode i jedno upozorenje. Aktivni alarmi i upozorenje se prikazuju u obliku poruke sa vremenom i datumom nastanka te stanjem. Popis svih alarma i upozorenja prikazan je tablicom 6.1. Slikom 6.4. prikazan je izgled alarma kad su isključene sklopka za proporcionalni ventil i sklopka za grijač i hladnjak.

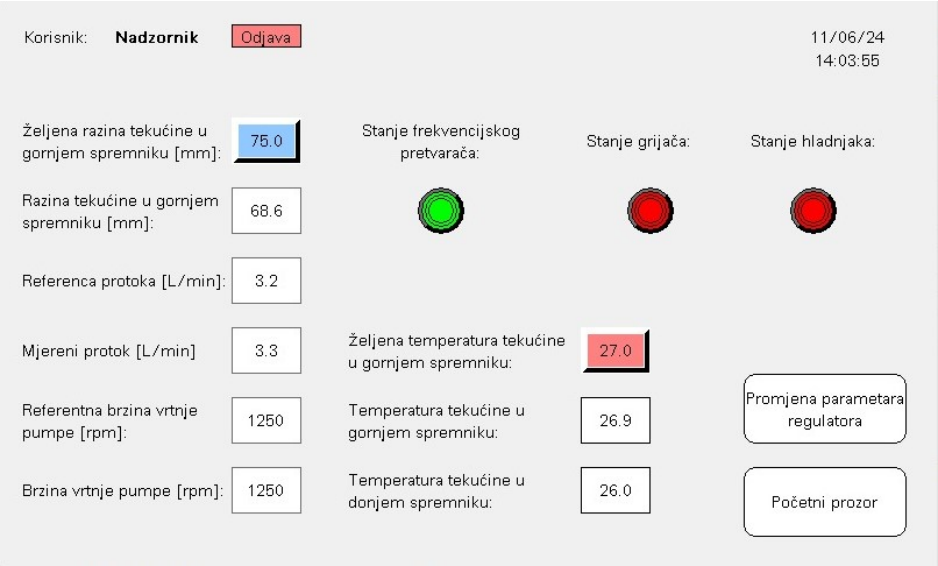
Tablica 6.1. Popis alarma i upozorenja

Alarmi
Sklopka za grijač i hladnjak je isključena
Proporcionalni ventil je isključen
Temperaturni senzori i senzor razine su isključeni
Greška na frekvencijskom pretvaraču
Prekinuta komunikacija s frekvencijskim pretvaračem
Prekinuta komunikacija s PLC-om
Upozorenje
Potrebno otvoriti ručni ventil



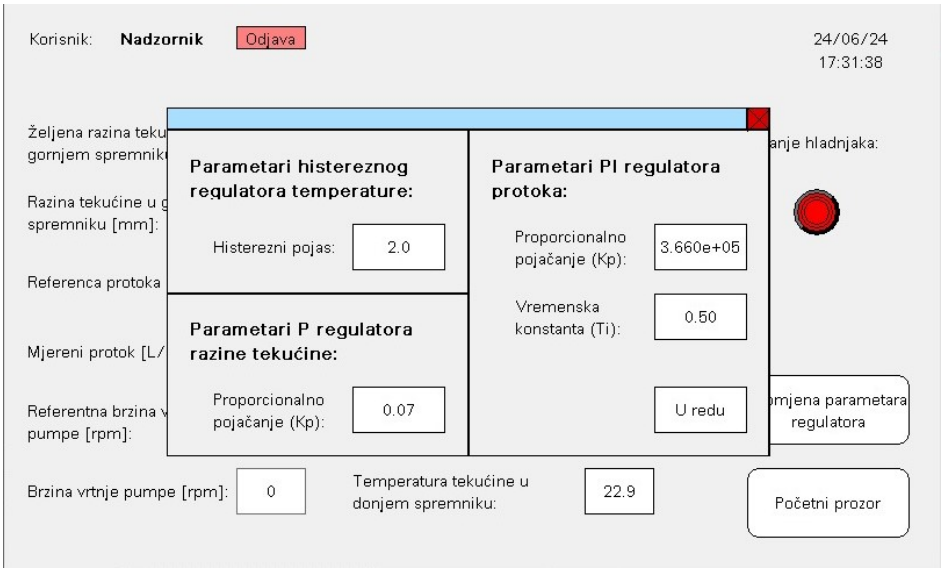
Slika 6.4. Prikaz aktivnih alarma

S početnog prozora može se otvoriti prozor za nadzor sustava pritiskom na tipku Nadzor sustava. Prozor za nadzor sustava (slika 6.5.) sadrži informacije o najvažnijim parametrima sustava. U prozoru za nadzor sustava prikazane su informacije o referentnim i mjerenim vrijednostima razine tekućine u gornjem spremniku, brzine protoka, brzine vrtnje pumpe i temperature tekućine u gornjem i donjem spremniku. Također, u prozoru za nadzor sustava nalaze se tri lampice koje signaliziraju stanje frekvencijskog pretvarača, grijača i hladnjaka. Ukoliko lampice svijetle crveno navedeni uređaji su isključeni, a ako svijetle zeleno su uključeni.



Slika 6.5. Nadzor sustava prijenosa vode

Nadzornik ima mogućnost promjene parametara regulatora razine tekućine, brzine protoka i histereznog regulatora pritiskom na tipku Promjena parametara regulatora na glavnom upravljačkom prozoru ili na prozoru za nadzor sustava. Pritiskom na tipku Promjena parametara regulatora otvara se skočni prozor prikazan slikom 6.6. U skočnom prozoru moguće je promijeniti histerezni pojas histereznog regulatora temperature, proporcionalno pojačanje regulatora razine tekućine te proporcionalno pojačanje i integralnu vremensku konstantu regulatora brzine protoka.



Slika 6.6. Promijena parametara regulatora

7. Zaključak

U radu je realizirano upravljanje razinom i temperaturom tekućine laboratorijskog modela sustava prijenosa tekućine. Algoritam upravljanja razinom tekućine i temperaturom tekućine zadovoljava sve zahtjeve stavljena na sustav prijenosa tekućine. Rezultati dobiveni eksperimentalno se razlikuju od simulacijskih rezultata što je očekivano zbog linearizacije i zanemarivanja kašnjenja pojedinih elementa sustava. Najveći problem laboratorijskog postava predstavlja pumpa koja je oštećena te iz nje dosta vode curi van. Iz tog razloga nije provedeno daljnje usavršavanje algoritma upravljanja razinom tekućine pomoću promjene brzine vrtnje pumpe kojom bi se povećao opseg upravljanja brzinom protoka tekućine.

Drugi problem na koji se naišlo prilikom izrade rada je ručni ventil za pražnjenje gornjeg spremnika. Zbog ručnog ventila je onemogućeno u potpunosti automatizirano upravljanje sustavom prijenosa tekućine. Ručnim ventilom se narušava preciznost upravljanja razinom i temperaturom tekućine zbog postojanja ljudskog faktora koji ne može upravljati ručnim ventilom precizno kao PLC. Također, zbog ručnog ventila je potrebno da se sustav prijenosa tekućine nadgleda dok je god u pogonu jer korisnik mora otvoriti ventil ako temperatura tekućine izađe iz histereznog pojasa regulacije ili dođe do promjene željene razine tekućine. Za preciznije upravljanje sustavom prijenosa vode potrebno je ručni ventil zamijeniti motoriziranim proporcionalnim ventilom.

Literatura

[1] Schneider Electric, *Altivar Process Variable Speed Drives ATV930, ATV950 Installation Manual*, 2023.

[2] A. Swales, *Open Modbus/TCP Specification*, 1999.

[3] Schneider Electric, *Modicon M262 Logic/Motion Controller User Guide*, 2024.

[4] Schneider Eletric, *Harmony GTU User Manual*, 2022.

[5] M. Mihaljević, *Sustav regulacije temperature i protoka laboratorijskog modela sustava prijenosa vode*, 2023.

[6] N. Perić i J. Matuško, *Upravljanje elektromotornim pogonima*, 2014.

Sažetak

Sustav regulacije razine tekućine laboratorijskog modela sustava prijenosa vode

Matej Baričević

U radu je opisana izrada algoritma upravljanja laboratorijskim modelom sustava prijenosa tekućine. Algoritam upravljanja je programiran koristeći programski paket *EcoStruexure Machine Expert* te je zatim implementiran u programirljivi logički kontroler. Pomoću izrađenog algoritma može se upravljati razinom i temperaturom tekućine u spremniku. Razinom tekućine upravlja se kaskadnom regulacijom koristeći dva regulatora. Za unutarnju petlju koristi se PI regulator brzine protoka, a za vanjsku petlju P regulator razine tekućine. Temperatura tekućine se regulira korištenjem histereznog regulatora. Za upravljanje sustavom prijenosa tekućine izrađeno je vizualizacijsko sučelja pomoću kojega se zadaju željene vrijednosti razine i temperature tekućine, nadgledaju trenutna stanja sustava te mijenjaju parametri regulatora.

Ključne riječi: sustav prijenosa tekućine; programirljivi logički kontroler; vizualizacijsko sučelje; PI regulator; histerezni regulator temperature

Abstract

Liquid Level Control System of a Laboratory Model of a Water Transfer System

Matej Baričević

This paper describes the process of creating a control algorithm for a laboratory model of a liquid transfer system. The control algorithm was programmed using the *EcoStruxure Machine Expert* software package, which was then implemented in a programmable logic controller. Using the developed algorithm, the level and temperature of the liquid in the tank can be managed. Liquid level is regulated by a cascade control system using two controllers. For the inner loop, the PI controller of flow rate is used, and for the outer loop, the P controller of liquid level is used. The temperature of the liquid is regulated using a hysteresis regulator. For managing the liquid transfer system, a human machine interface was created, which allows you to set the desired values of the liquid level and temperature, monitor the current state of the system, and change the parameters of controllers.

Keywords: liquid transfer system; programmable logic controller; human machine interface; PI controller; temperature controller with hysteresis

Popis slika

3.1. Laboratorijski postav 6
3.2. Unutrašnjost elektro ormara 7
3.3. Frekvencijski pretvarač [1] 9

4.1. Matematički model laboratorijskog postava u otvorenom krugu 11
4.2. Matematički model laboratorijskog postava u zatvorenom krugu 12
4.3. Unutarnja petlja matematičkog modela laboratorijskog postava 13
4.4. Pojednostavljeni matematički model laboratorijskog postava u otvorenom krugu 14
4.5. Simulacijski model laboratorijskog postava 14
4.6. Odziv simulacijskog modela 15
4.7. Funkcijski blok PI regulatora 17
4.8. Funkcijski blok P regulatora 18
4.9. Odziv razine tekućine 20
4.10. Odziv razine tekućine uz promijenjene parametre regulatora 21

5.1. Funkcijski blok temperaturnog regulatora 22
5.2. Odziv regulacije temperature 23

6.1. Prijava korisnika 24
6.2. Neispravna prijava korisnika 25
6.3. Glavni prozor vizualizacijskog sučelja 25
6.4. Prikaz aktivnih alarma 26
6.5. Nadzor sustava prijenosa vode 27
6.6. Promijena parametara regulatora 28

Popis tablica

3.1. Popis opreme u elektro ormaru 8
3.2. Nazivni podaci asinkronog stroja 9
3.3. Nazivni podaci frekvencijskog pretvarača 10
3.4. Popis ulaznih i izlaznih signala spojenih na I/O module 10

4.1. Popis varijabli funkcijskog bloka PI regulatora 17
4.2. Popis varijabli funkcijskog bloka P regulatora 19

5.1. Popis varijabli funkcijskog bloka temperaturnog regulatora 23

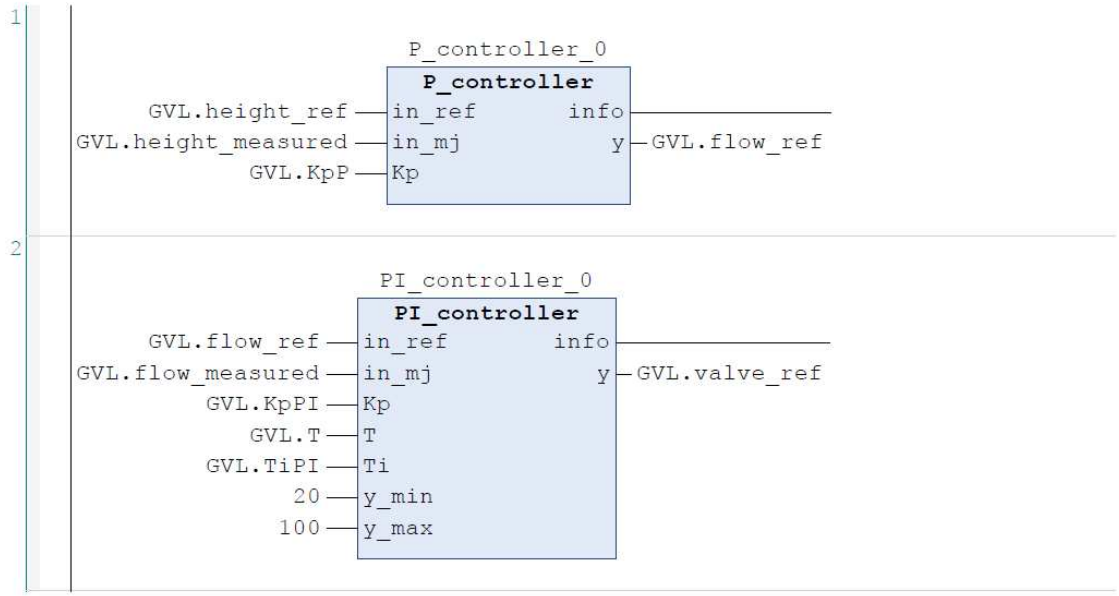
6.1. Popis alarma i upozorenja 26

Privitak A: Programski kod

Priložen je programski kod izrađen za upravljanje laboratorijskim postavom sustava prijenosa vode.

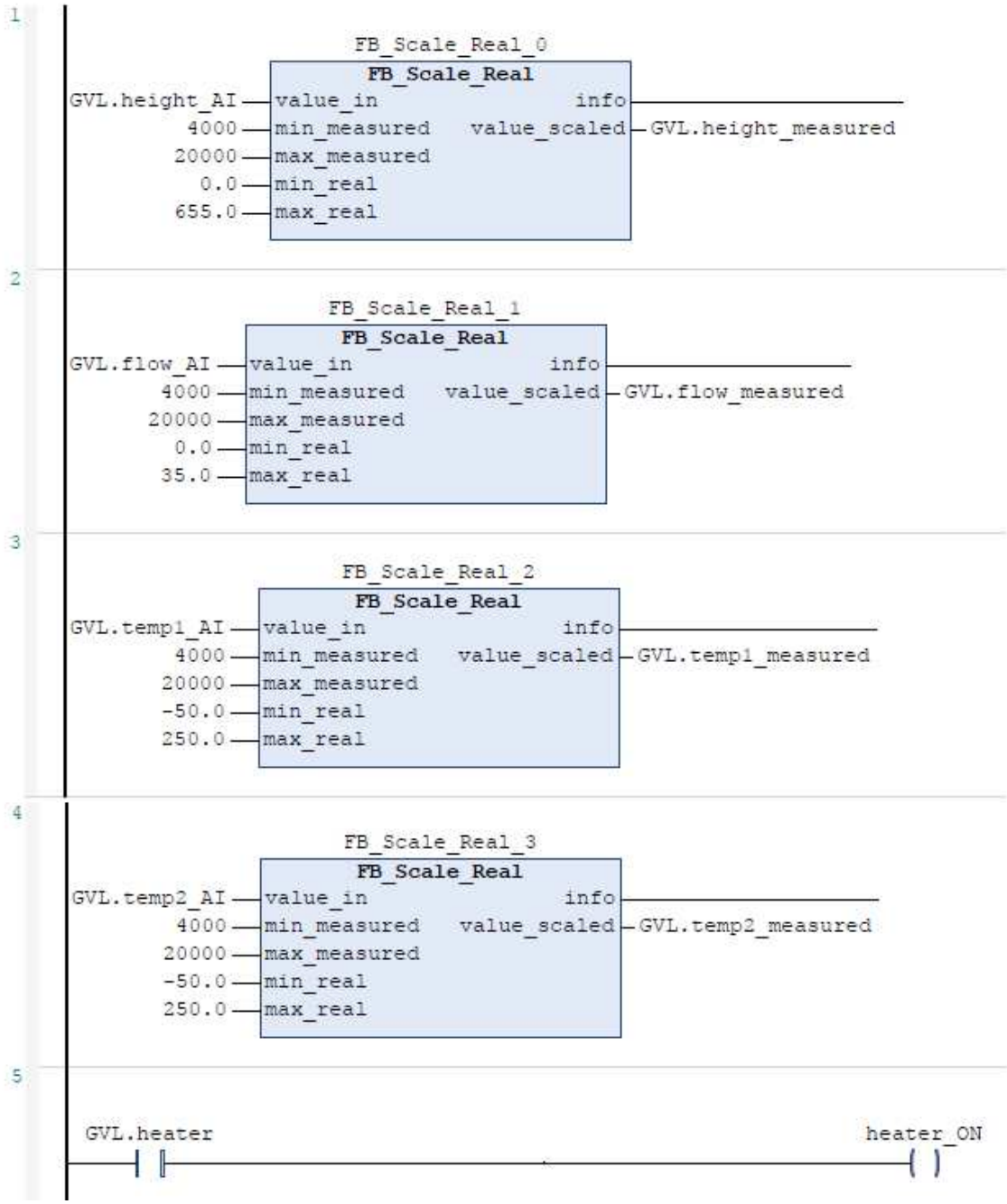
POU: Controllers

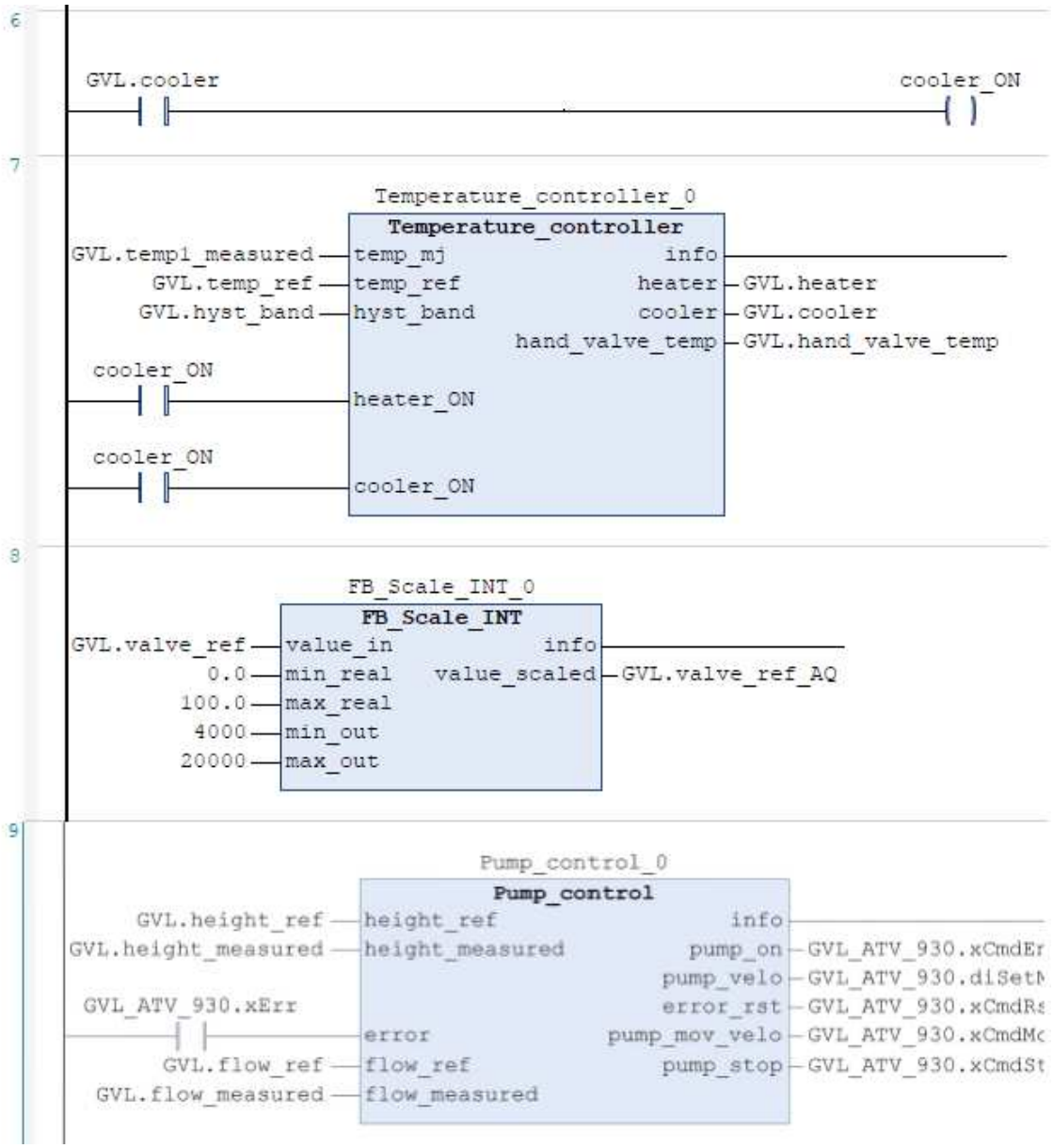
```
1   PROGRAM Controllers
2   VAR
3       PI_controller_0 : PI_controller ;
4       P_controller_0 : P_controller ;
5   END_VAR
6
```



POU: SR_Main

```
1   PROGRAM SR_Main
2   VAR
3       FB_Scale_Real_0 : FB_Scale_Real ;
4       FB_Scale_Real_1 : FB_Scale_Real ;
5       FB_Scale_Real_2 : FB_Scale_Real ;
6       FB_Scale_Real_3 : FB_Scale_Real ;
7       FB_Scale_INT_0 : FB_Scale_INT ;
8       heater_ON : BOOL ;
9       cooler_ON : BOOL ;
10      Temperature_controller_0 : Temperature_controller ;
11      Pump_control_0 : Pump_control ;
12      Prijava_0 : Prijava ;
13  END_VAR
14
```




6
GVL.cooler
cooler_ON
7
Temperature_controller_0
Temperature_controller
GVL.temp1_measured
temp_mj
info
GVL.temp_ref
temp_ref
heater
GVL.heater
GVL.hyst_band
hyst_band
cooler
GVL.cooler
hand_valve_temp
GVL.hand_valve_temp
cooler_ON
heater_ON
cooler_ON
cooler_ON
8
FB_Scale_INT_0
FB_Scale_INT
GVL.valve_ref
value_in
info
0.0
min_real
value_scaled
GVL.valve_ref_AQ
100.0
max_real
4000
min_out
20000
max_out
9
Pump_control_0
Pump_control
GVL.height_ref
height_ref
info
GVL.height_measured
height_measured
pump_on
GVL_ATV_930.xCmdEr
pump_velo
GVL_ATV_930.diSetN
GVL_ATV_930.xErr
error_rst
GVL_ATV_930.xCmdRs
error
pump_mov_velo
GVL_ATV_930.xCmdMc
GVL.flow_ref
flow_ref
pump_stop
GVL_ATV_930.xCmdSt
GVL.flow_measured
flow_measured

POU: PI_controller

```
1   FUNCTION_BLOCK PI_controller
2   VAR_TEMP
3       u : REAL ;
4   END_VAR
5   VAR
6       u_prev : REAL ;
7       y_prev : REAL ;
8   END_VAR
9   VAR_INPUT
10      in_ref : REAL ;
11      in_mj : REAL ;
12      Kp : REAL ;
13      T : REAL ;
14      Ti : REAL ;
15      y_min : REAL ;
16      y_max : REAL ;
17  END_VAR
18  VAR_OUTPUT
19      info : BOOL ;
20      y : REAL ;
21  END_VAR
22
```

```
1   // Izračun razlike između referentne veličine i mjerene veličine
2   u := in_ref - in_mj ;
3
4   // Izračun izlaza iz diskretnog regulatora
5   y := Kp * ( 1 + T / Ti ) * u - Kp * u_prev + y_prev ;
6
7   // Ograničavanje izlazne vrijednosti
8   IF y > y_max THEN
9       y := y_max ;
10  ELSIF y < y_min THEN
11      Y := y_min ;
12  END_IF
13
14  // Pamćenje prošlih vrijednosti
15  u_prev := u ;
16  y_prev := y ;
17
```

POU: P_controller

```
1   FUNCTION_BLOCK P_controller
2   VAR_TEMP
3       u : REAL ;
4   END_VAR
5   VAR_INPUT
6       in_ref : REAL ;
7       in_mj : REAL ;
8       Kp : REAL ;
9   END_VAR
10  VAR_OUTPUT
11      info : BOOL ;
12      y : REAL ;
13  END_VAR
14
```

```
1   // Osiguravanje da regulator radi samo kad je referentna razina tekućine
2   // veća od stvarne razine tekućine u gornjem spremniku
3   IF in_ref > in_mj THEN
4
5       // Izračun razlike između referentne veličine i mjerene veličine
6       u := in_ref - in_mj ;
7
8       // Izračun izlaza iz regulatora
9       y := Kp * u ;
10
11  END_IF
12
```

POU: FB_Scale_INT

```
1   FUNCTION_BLOCK FB_Scale_INT
2   VAR_INPUT
3       value_in : REAL ;
4       min_real : REAL ;
5       max_real : REAL ;
6       min_out : INT ;
7       max_out : INT ;
8   END_VAR
9   VAR_OUTPUT
10      info : BOOL ;
11      value_scaled : INT ;
12  END_VAR
13  VAR
14  END_VAR
15
```

```
1   // Skaliranje stvarne vrijednosti vrijednost koju prima analogni izlaz
2   value_scaled := TO_INT ( ( ( value_in - min_real ) / ( max_real - min_real )
    ) * ( max_out - min_out ) + min_out ) ;
3
```

POU: Temperature_controller

```
1   FUNCTION_BLOCK Temperature_controller
2   VAR_INPUT
3       temp_mj : REAL ;
4       temp_ref : REAL ;
5       hyst_band : REAL ;
6       heater_ON : BOOL ;
7   END_VAR
8   VAR_OUTPUT
9       info : BOOL ;
10      heater : BOOL ;
11      cooler : BOOL ;
12      hand_valve_temp : BOOL ;
13  END_VAR
14  VAR_INPUT
15      cooler_ON : BOOL ;
16  END_VAR
17
```

```
1   // Histerezni regulator za regulaciju temperature tekućine pomoću hladnjaka
    i grijača
2
3   // Upravljanje kod dosezanja gornje granice regulacije
4   IF temp_mj > ( temp_ref + hyst_band / 2 ) AND NOT heater_ON THEN
5       cooler := TRUE ;
6       hand_valve_temp := TRUE ;
7   ELSIF temp_mj > ( temp_ref + hyst_band / 2 - 0.1 ) THEN
8       heater := FALSE ;
9       hand_valve_temp := FALSE ;
10  END_IF
11
12  // Upravljanje kod dosezanja donje granice regulacije
13  IF temp_mj < ( temp_ref - hyst_band / 2 ) AND NOT cooler_ON THEN
14      heater := TRUE ;
15      hand_valve_temp := TRUE ;
16  ELSIF temp_mj < ( temp_ref - hyst_band / 2 + 0.1 ) THEN
17      cooler := FALSE ;
18      hand_valve_temp := FALSE ;
19  END_IF
20
```

POU: Pump_control

```
1   FUNCTION_BLOCK Pump_control
2   VAR_INPUT
3       height_ref : REAL ;
4       height_measured : REAL ;
5       error : BOOL ;
6       flow_ref : REAL ;
7       flow_measured : REAL ;
8   END_VAR
9   VAR_OUTPUT
10      info : BOOL ;
11      pump_on : BOOL ;
12      pump_velo : INT ;
13      error_rst : BOOL ;
14      pump_mov_velo : BOOL ;
15      pump_stop : BOOL ;
16  END_VAR
17  VAR
18      pump_velo_temp : INT ;
19  END_VAR
20
```

```
1   // Program za upravljanje frekvencijskim pretvaračem
2
3   // Inicijalizacija brzine vrtnje motora
4   IF pump_velo_temp <> 1250 THEN
5
6       pump_velo_temp := 1250 ;
7
8   END_IF
9
10  // Zadavanje brzine vrtnje motoru
11  pump_velo := pump_velo_temp ;
12
13  // Program za uključivanje frekvencijskog pretvarača
14  IF height_ref > ( height_measured ) THEN
15
16      // Uključivanje frekvencijskog pretvarača
17      pump_on := TRUE ;
18      pump_stop := FALSE ;
19
20      // Potvrda greške
21      IF error THEN
22          error_rst := TRUE ;
23      ELSE
24          error_rst := FALSE ;
25      END_IF
26
27      // Pokretanje motora
28      pump_mov_velo := TRUE ;
29
30  // Program za isključivanje frekvencijskog pretvarača
31  ELSIF height_ref <= ( height_measured ) THEN
32
33      pump_stop := TRUE ;
34      pump_on := FALSE ;
35      pump_mov_velo := FALSE ;
36
37  END_IF
38
```

POU: FB_Scale_Real

```
1   FUNCTION_BLOCK FB_Scale_Real
2   VAR_INPUT
3       value_in : INT ;
4       min_measured : INT ;
5       max_measured : INT ;
6       min_real : REAL ;
7       max_real : REAL ;
8   END_VAR
9   VAR_OUTPUT
10      info : BOOL ;
11      value_scaled : REAL ;
12  END_VAR
13
```

```
1   // Skaliranje analognog ulaza u stvarnu vrijednost
2   value_scaled := ( TO_REAL ( value_in - min_measured ) / ( max_measured -
    min_measured ) ) * ( max_real - min_real ) + min_real ;
3
```